

金属蒸気混入時のヘリウムガスタングステンアークのプラズマ特性*

田代 真一**, 田中 学**, 中田 一博**, 岩尾 徹***
奥石 房樹****, 鈴木 啓一****, 山崎 圭****

Plasma Properties of Helium Gas Tungsten Arc with Metal Vapor *

By TASHIRO Shinichi**, TANAKA Manabu **, NAKATA Kazuhiro**, IWAO Toru****,
KOSHIISHI Fusaki****, SUZUKI Keiichi**** and YAMAZAKI Kei****

Energy source properties of electric arcs strongly depend on physical properties of the arc plasma. In a welding process, it has been experimentally confirmed that an admixture of metal vapor diffused from a high temperature weld pool drastically changes the properties of arc plasma and lowers its temperature. However, the effect of the admixture on heat input characteristics to a base metal is not clear due to the difficulty of the experimental study. In this paper, energy source properties of He GTA with the admixture of metal vapor were numerically analyzed. Consequently, it was found that the intense radiation generated by the dense metal vapor constricts the current density distribution especially near the arc axis and decreases the heat input to the base metal.

Key Words: Numerical simulation, Gas tungsten arc, Helium, Metal vapor, Heat input, Radiation

1. 結 論

Gas Metal Arc(GMA)に代表されるアーク溶接プロセスにおいては、高温となった溶接ワイヤの溶滴や溶融池の表面から発生する多量の金属蒸気の混入によって、電気伝導度等のプラズマの物性値が著しく変化するため、これがアークプラズマの温度低下等を引き起こし、更には母材への入熱を低下させることが知られている。したがって、溶接効率向上のためには金属蒸気が溶接プロセスに及ぼす影響の解明が不可欠である。

金属蒸気混入時におけるアークプラズマ温度分布の変化に関しては、これまでに取り扱いが比較的容易な Gas Tungsten Arc (GTA) について多くの検討がなされている。例えば、分光計測により銅蒸気混入時のアルゴン(Ar)GTA^{1,2)}及び窒素(N₂)GTA³⁾が検討され、金属蒸気混入に伴い電気伝導度が増加し、純 Ar および純 N₂ の場合と比較して、陽極近傍で 2000K 程度の温度低下が生じる結果が得られた。近年では、SUS304 を母材とした場合の金属蒸気混入時のヘリウム(He)GTA の特性についても実験が行われ、溶融池とな

る陽極近傍では金属蒸気混入率は5%を上回り、特にアーク外縁部で最大 6000K 程度の温度低下が生じることが明らかとなった^{4,5,6)}。しかしながら、200A の大電流条件では、強い陰極ジェットの影響により、金属蒸気は陽極近傍から吐き出されるため、金属蒸気の混入は温度分布に強い影響を与えないという報告もある⁷⁾。一方、数値解析によっても多くの検討が試みられている。ArGTA については、銅蒸気⁸⁾及び鉄蒸気⁹⁾混入時の温度分布の電磁熱流体解析が行われ、陽極近傍での温度低下は 2000K 程度になると報告されている。

これに対して GMA の場合、溶融池表面に加えて、溶接ワイヤの溶滴表面からも多くの金属蒸気が発生することが知られている。Fig.1 は溶接時の HeGTA^{4,5,6)}と HeGMA のアーク概観写真を比較したものである。ともに純 He をシールドガスとして使用している。GTA では金属蒸気の混入が溶融池近傍に限定され、アーク柱の大部分は He プラズマに特有な赤紫色の発光となるが、GMA では金属蒸気が高い混入率でアーク柱全体にわたって分布し、青色の発光となっていることがわかる。したがって、GMA 溶接においては、プラズマ特性に及ぼす金属蒸気の影響が、上述の GTA 溶接の場合に比べて、はるかに大きくなることが予想される。一方 GMA では、プラズマのみならず溶接ワイヤ端における溶滴の形成、離脱および移行との連成を考慮する必要があるため、非常に高度な数値解析を要求されるが、計算機性能の向上に伴い、近年徐々にその成果が得られつつある^{10,11)}。しかしながら、金属蒸気混入の影響については未だ考慮に入

*原稿受付 平成17年9月26日 平成17年度秋季全国大会で発表

**正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining and Welding Research Institute Osaka University

*** 武蔵工業大学 Musashi Institute of Technology

****正 員 株式会社神戸製鋼所 Member, KOBE STEEL, LTD

れられていないのが現状であり、今後の重要な課題として挙げられている。

そこで本論文では、溶接プロセスにおいて一般的に利用されるアーク放電条件の範囲内で、GMA 溶接で観察されるように金属蒸気が十分にアーク柱内に混入した場合のプラズマ特性に及ぼす影響のみを抽出し、その基礎評価を試みることにした。したがって、溶滴の形成、離脱および移行からなる一連の複雑な現象を避けて、金属蒸気がアークプラズマ全体に均一に混入したと仮定した場合の、HeGTA のプラズマ特性について数値解析による仮想実験を行うと共に、母材への入熱特性についても評価した結果について報告する。なお、母材としては過去の検討¹²⁾により計算結果の妥当性が確認されており、プラズマからの入熱評価も容易である水冷銅陽極を採用し、金属蒸気としては溶接時の主要成分のひとつである鉄を仮定した。

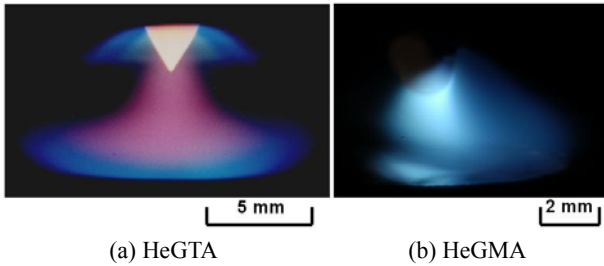


Fig. 1 Photographs of GTA welding and GMA welding in helium at 150A in arc current.

2. シミュレーションモデル

Fig.2 は水冷銅陽極、酸化トリウム入りタングステン陰極(陰極径 3.2mm、先端角 60 度)、電極間距離 5mm の GTA トーチの構造を模擬した、軸方向座標 z 及び径方向座標 r で定義される 2 次元円筒座標系の軸対象なシミュレーション領域である。領域寸法は A-C 間 45mm 及び A-F 間 25mm とした。入力電流は 150A とする。前述したように、GMA では GTA と比較してより多くの金属蒸気が混入するものと推測される。そこで、アークプラズマの組成については、実験により確認された GTA の金属蒸気混入率⁶⁾以上の値として、純 He 及び 5%、10%、20%、30%鉄蒸気混入時の He の 5 種類を考慮した。ここでは、局所熱平衡(LTE)状態が成立するものとし、層流及び非圧縮性を仮定した電磁流体方程式および補助方程式(1)~(6)を SIMPLEC 法¹³⁾を用いて解くことにより、定常状態におけるアークプラズマ特性を求める。ただし、アークプラズマは光学的に薄く、準中性条件を満たすものとする。境界条件及び計算方法の詳細は文献^{14,15)}と同様とした。

(1) 質量保存則

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0$$

(2) 径方向運動量保存則

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_r v_z) &= -\frac{\partial P}{\partial r} - j_z B_\theta \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(2r \eta \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_r}{\partial z} + \eta \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) &- 2\eta \frac{v_r}{r^2} \end{aligned}$$

(3) 軸方向運動量保存則

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z^2) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + j_r B_\theta \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta \frac{\partial v_r}{\partial z} + r \eta \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) &+ \rho g \end{aligned}$$

(4) エネルギー保存則

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r h) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z h) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r \kappa}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\kappa}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + j_r E_r + j_z E_z - R \end{aligned}$$

(5) 電荷保存則

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r j_r) + \frac{\partial}{\partial z} (j_z) = 0$$

(6) オームの法則

$$j_r = -\sigma E_r, j_z = -\sigma E_z$$

ここで、 ρ は質量密度、 P は圧力、 v_z 及び v_r は軸方向及び径方向の流速、 η は粘性、 h はエンタルピー、 j_z 及び j_r は軸方向及び径方向の電流密度、 g は重力加速度、 κ は熱伝導度、 C_p は比熱、 σ は電気伝導度、 R は放射係数(放射損失)、 E_z 及び E_r は $E_z = -\partial V / \partial z$ および $E_r = -\partial V / \partial r$ で定義される軸方向及び径方向の電界強度、但し V は電位である。アーク電流により生じる磁界強度は以下のマクスウェルの方程式により求められる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_\theta) = \mu_0 j_z$$

ただし、 μ_0 は真空中の透磁率である。

式(1)~(6)に加えて、電極表面でのみ生じる熱流束については特別な扱いが必要である。陰極表面における熱流束 H_K としては、放射冷却、熱電子放出による冷却、陰極表面へのイオン衝突による加熱を考慮し、

$$H_K = -\varepsilon \alpha T^4 - |j_e| \phi_K + |j_i| V_i$$

と定義する。ここで、 ε は陰極の表面放射係数、 α はステフ

アンボルツマン係数、 ϕ_K は陰極材料の仕事関数、 V_i はプラズマガスの電離電圧、 j_e は電子電流密度、 j_i はイオン電流密度である。また、 j_e は下式で与えられる Richardson の式により決定される熱電子電流密度 J_R ¹⁶⁾以下となる。

$$|j_R| = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi_{Ke}}{k_B T}\right)$$

ここで、 A は陰極材料に依存する定数、 ϕ_{Ke} は陰極材料の実効仕事関数、 k_B はボルツマン定数である。 $|j|$ が $|j_R|$ より大きい時、イオン電流密度 j_i は $|j| - |j_R|$ と仮定する。但し、 $|j| = |j_e| + |j_i|$ は式(5)より得られる陰極表面における全電流密度である。同様に、陽極表面に対する熱流束 H_A としては、放射冷却及び熱電子の流入による加熱を考慮し、

$$H_A = -\varepsilon\alpha T^4 + |j|\phi_A$$

を定義する。ここで、 ϕ_A は陽極の仕事関数、 $|j|$ は式(5)より得られる陽極表面における電流密度である。

本シミュレーションで用いた熱力学係数及び輸送係数は「first-chapman-enskog」近似¹⁷⁾に基づき算出し、放射係数については文献18と同様の手法により求めた。金属蒸気の物性の一般的な特徴として、電気伝導度や放射損失の大きい点が挙げられる。そこで、主要な物性データとして、これらの温度依存性を Fig.3及び4に示す。

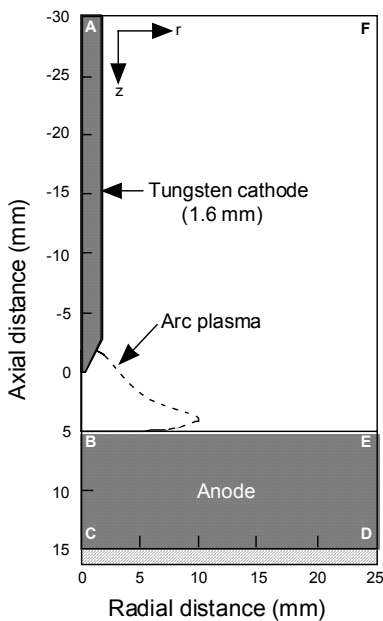


Fig. 2 Schematic illustration of simulation domain.

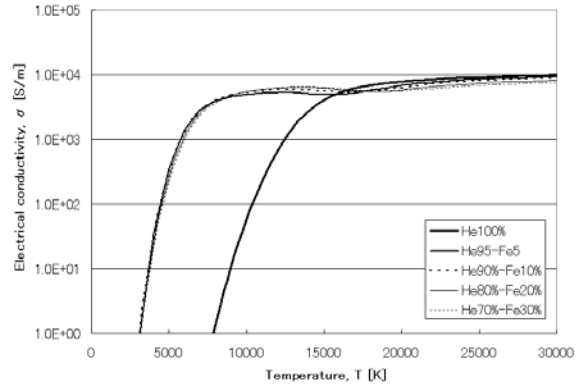


Fig. 3 Dependence of electrical conductivities on temperature for each mixing ratio.

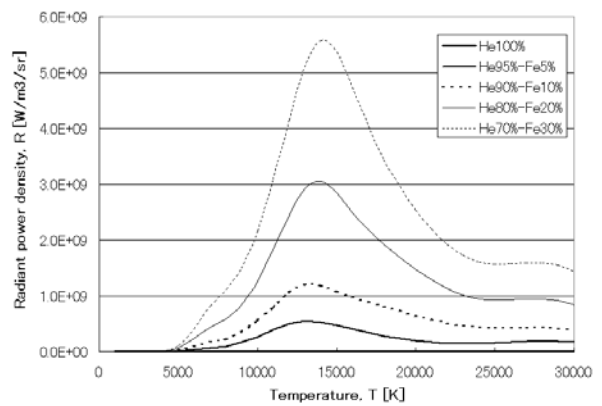


Fig. 4 Dependence of radiant power density on temperature for each mixing ratio.

3. シミュレーション結果と考察

各鉄蒸気混入率における領域内温度分布及びプラズマ流体速度分布を Fig.5~7 に、陽極表面における電流密度の半径方向分布を Fig.8 に、陽極への入熱密度分布を Fig.9 に示す。更に、Fig.10にはアーク軸上に見られる陽極表面温度最高値(左軸)及び入熱密度最大値(右軸)の鉄蒸気混入率依存性を、Fig.11には投入電力、陽極への入熱量、放射損失(左軸)及び熱効率(右軸)の鉄蒸気混入率依存性を示す。Fig.10の入熱密度最大値については、熱伝導による入熱成分(Conduction)及び熱電子の流入による入熱成分(Electron)についても併記した。

まず Fig.5~7 のプラズマ温度分布に注目すると、鉄蒸気の混合率の増加に伴い、陰極近傍においては若干の温度上昇が生じ、それ以外の領域では逆に顕著な温度低下が見られた。5%の混入率では、アーク柱外縁部 ($r=2.0\text{mm}$) および陽極近傍 ($z=4.0\text{mm}$) において、純 He と比較して 6000K 程度の低下となり、実験結果による傾向⁴⁾と概ね一致することがわかる。

前述したように、金属蒸気の物性の一般的な特徴として、電気伝導度や放射損失の大きい点が挙げられる。鉄蒸気の電離電圧 (7.9eV) は He (24.6eV) に比べて3分の1程度と低いことから¹⁹⁾、少量の混入であっても電気伝導度は著しく上昇する。Fig.3 に示したように、この傾向は特に低温域で顕著であり、鉄蒸気混入時の電気伝導度は純 He の場合と比較して約 15000K 以下では数桁高いが、これ以上の温度ではほぼ同程度となる。また、放射損失に関しては、He の放射は微弱であるため、鉄蒸気混入率にほぼ比例して増加する。

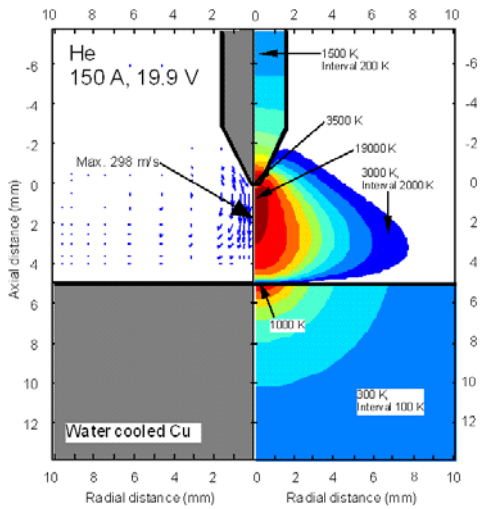


Fig. 5 Two-dimensional distributions of temperature and fluid flow velocity for pure He.

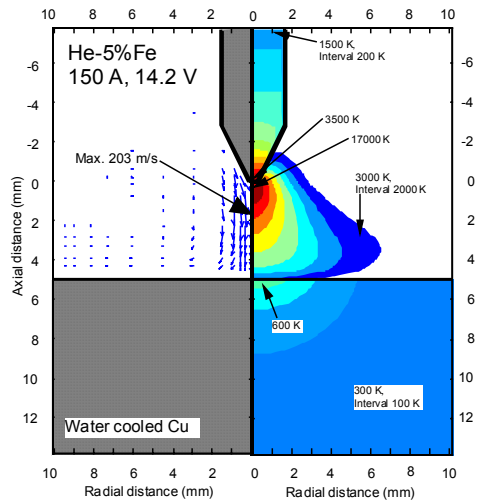


Fig. 6 Two-dimensional distributions of temperature and fluid flow velocity for He-5%Fe.

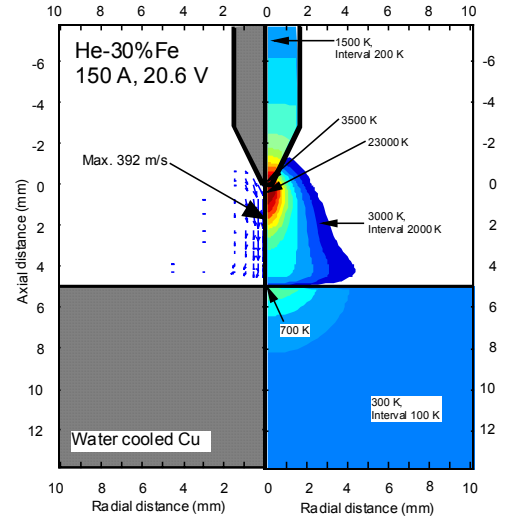


Fig. 7 Two-dimensional distributions of temperature and fluid flow velocity for He-30%Fe.

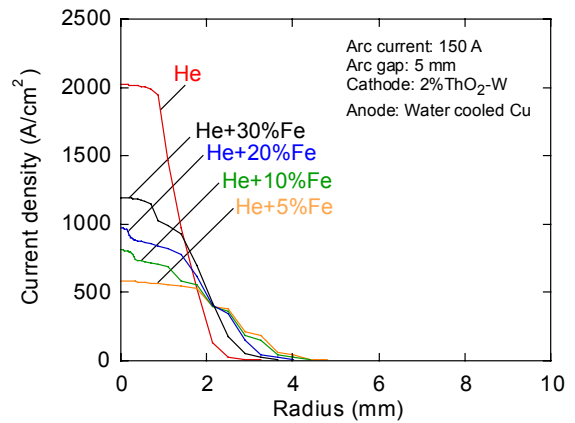


Fig. 8 Radial distributions of current density on the anode surface.

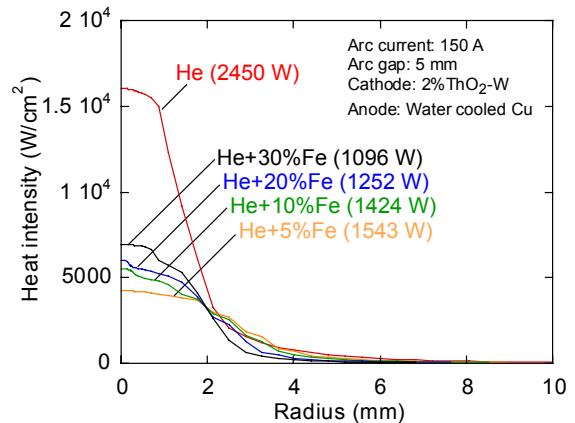


Fig. 9 Radial distributions of heat intensity on the anode surface.

したがって、Fig.8 に示されたように、陰極近傍を除くプラズマが比較的低温である領域では、鉄蒸気 5% の混入により電気伝導度が増加し、電流密度分布が平坦化する。結果として、同領域では電気伝導度の増加に伴うジュール加熱の減少に放射損失の増加が加わり、プラズマ温度の低下が生じる。一方、5% 以上の混入率では、アーク軸近傍において電流密度分布が緊縮する傾向を示す。これ以上の混入率では Fig.3 に示したように電気伝導度が飽和する為、放射損失の影響が支配的となり、これがサーマルピンチ効果と同様に電流密度分布の緊縮を促したものと推測される。同様の理由により、陰極近傍の高温領域では、鉄蒸気混入による電気伝導度の増加は無視できる程度であることから、放射損失の影響による電流密度分布の緊縮が顕著となり、結果として電流密度の増加により温度上昇と陰極ジェットの流速増加が見られたものと考えられる。Fig.7 に示したように、鉄蒸気 30% 混入時には、アーク柱の明らかな緊縮がみられるとともに、プラズマの最高温度が 23000K、陰極ジェットの流速が 392m/s に達していることがわかる。

以上の陽極近傍のプラズマ温度と電流密度の低下によって、Fig.9 及び 10 に示された鉄蒸気 5% 混入時の陽極への最大入熱密度は、純 He の 30% 程度にまで低下し、陽極表面温度も大幅に低下することが判る。これ以上の混入率に対しては、放射損失によるサーマルピンチ効果が顕著となるため電流密度分布が緊縮し、熱電子流入による入熱成分が増加する。結果として、5% 以上の混入率に対して、最大入熱密度と表面温度は僅かながらも増加する傾向が得られた。

また、Fig.11 に示した放射損失は、ほぼ鉄蒸気混入率に比例して増加する。これに伴い陽極近傍のプラズマ温度は半径方向の広い範囲に渡って低下することから、陽極への全入熱量は反比例して減少することがわかる。一方、入力電力は混入率 5% 以下では電気伝導度の上昇の影響により低下傾向となるが、これ以上の混入率では放射損失を補うために一転して増加傾向となることがわかる。結果として、混入率の上昇により熱効率は大幅に低下し、混入率 30% で熱効率 50% 以下となった。

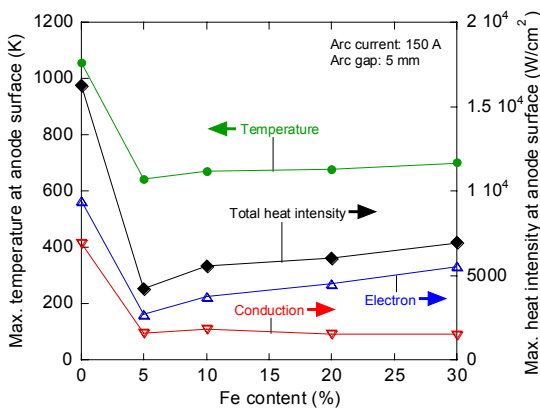


Fig. 10 Dependence of max. temperature at the anode surface and heat intensity to the anode on Fe content.

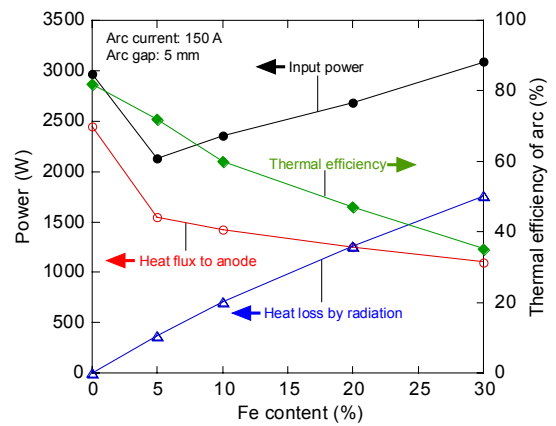


Fig. 11 Dependence of input power, thermal efficiency and heat flux to the anode and heat loss by radiation on Fe content.

4. 結 論

鉄蒸気混入時における HeGTA のアークプラズマ特性について数値解析による仮想実験を行うと共に、水冷銅陽極への入熱特性についても検討を行った。その結果、GMA の解析において、金属蒸気混入の影響を考慮に入れることは不可欠な要素であることが示唆された。以下に主要な結論を記す。

- 1) 鉄蒸気混入率の増加に伴い、放射損失が促進されると共に電気伝導度も上昇し、5% の混入率では、アーク柱周辺部および陽極近傍において、純 He と比較して 6000K 程度の低下となる。
- 2) 放射によるアークプラズマの熱損失は、サーマルピンチ効果と同様にアーク柱ならびに電流密度分布の緊縮を引き起こし、アークプラズマの最高温度を上昇させる。
- 3) 鉄蒸気 5% 混入時の陽極への最大入熱密度は、純 He の場合の 30% 程度にまで低下し、陽極表面温度も大幅に低下するが、これ以上の混入率に対しては、両者は増加傾向を示す。
- 4) 入力電力は、混入率 5% 以下では電気伝導度の上昇の影響により低下するが、これ以上の混入率では放射損失を補うために増加傾向となる。結果として、混入率の増加に伴い熱効率は大幅に低下し、混入率 30% で熱効率 50% 以下となる。

参 考 文 献

- 1) K. Etemadi and E. Pfender: Impact of Anode Evaporation on the Anode Region of a High-Intensity Argon Arc, *Plasma Chem. Plasma Proc.*, 5-2 (1985), 175-182.
- 2) M. Razafinimanana, L.EI. Hamidi, A. Gleizes and S. Vacquie: Experimental study of the influence of anode ablation on the characteristics of an argon transferred arc, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 4 (1995), 501-510
- 3) A.M. Rahal, B. Rahhaoui and S. Vacquie: Copper vapour diffusion in a nitrogen arc chamber, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 17 (1984), 1807-1822
- 4) H. Terasaki, M. Tanaka and M. Ushio: Effects on Metal Vapor on Electron Temperature in Helium Gas Tungsten Arcs, *Metall. mater. trans. A*, 33A(2002), 1183-1188
- 5) H. Terasaki, M. Tanaka and M. Ushio: Effect of Metal Vapor on Plasma State in Helium Gas Tungsten Arcs, *Quarterly Journal of Welding Society*, 20 (2002), 201-206
- 6) 寺崎：GTA 溶接におけるアークプラズマの物理構造の解明に関する研究，大阪大学大学院生産科学専攻修士論文 (2000)，51-53.
- 7) A.J.D. Farmer, G.N. Haddad and L.E. Cram : Temperature determinations in a free-burning arc : III. Measurements with molten anodes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 19 (1986), 1723-1730.
- 8) J. Menart and L. Lin : Numerical Study of a Free-Burning Argon Arc with Copper Contamination from Anode, *Plasma Chem. Plasma Process*, 19-2 (1999), 153-170.
- 9) J.J. Gonzalez, A. Gleizes, P. Proulx and M. Boulos: Mathematical modeling of a free-burning arc in the presence of metal vapor, *J. Appl. Phys.*, 74-5 (1993), 3065-3070.
- 10) H.G. Fan and R. Kovacevic: A unified model of transport phenomena in gas metal arc welding including electrode, arc plasma and molten pool, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 37 (2004), 2531-2544.
- 11) Y. Hirata, K. Ohnishi and T. Ohji : Numerical Model of Gas shielded Metal Arc Plasma with Metal Transfer, Preprints of the National meeting of JWS, 22 (2004), 80-81 (in Japanese).
- 12) M. Ushio, M. Tanaka and J.J. Lowke: Anode Melting From Free-Burning Argon Arcs *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 32 (2004), 108-117.
- 13) S.V. Patanker: Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, 1980
- 14) M. Tanaka, et.al.: A Unified Numerical Modeling of Stationary Tungsten-Inert Gas Welding Process, *Metal. Trans. A*, 33A (2002), 2043-2052.
- 15) M. Tanaka, et.al.: Numerical Study of Free-Burning Argon Arc with Anode Melting, *Plasma Chem. Plasma Process*, 23 (2003), 585-606.
- 16) E. Pfender: Electric Arcs and Arc Gas heaters, Ch. 6, published in M. H. Hirsh and H. J. Oskam, *Gaseous Electronics*, Academic Press, New York (1978), 291-398
- 17) J.M. Yos, Transport Properties of Nitrogen, Hydrogen Oxygen, and Air to 30000 K, RAD-TM- 63-7, 1963, Research and Advanced Development Division AVCO Corporation, Wilmington (MA).
- 18) S. Honda, Y. Inoue, T. Iwao, M. Yumoto, T. Inaba: Radiation Component in Wavelength emitted from High Temperature Argon Gas, The papers of Technical Meeting on Frontier Technology and Engineering, IEE Japan, 7 (2005), FTE-05-2
- 19) 鳥山他：放電ハンドブック，電気学会 (1980)，12.